

주암호 상류 보성강 유역 제4기 퇴적층의 층서유형

이진영[‡] · 김진철 · 김주용 · 홍세선 · 임재수 · 남옥현
한국지질자원연구원 국토지질연구본부 제4기지질연구실

요 약

층적층은 제4기 퇴적층으로 인류의 중요한 생활공간으로 이용되었다. 본 연구는 주암호 상류의 보성강 유역에 분포하는 제4기 퇴적층의 시추조사를 통해 퇴적시기와 퇴적환경, 그리고 퇴적층의 층서 변화를 조사하고, 층서유형을 제안하고자 하였다. 시추조사를 통해 총 23 지점의 퇴적층을 조사하고 53개의 방사성탄소연대를 분석하였다. 그 결과, 보성강 상류에 분포하는 제4기 퇴적층은 주로 홀로세 동안에 형성되었으며, 퇴적환경은 사면퇴적환경과 하천퇴적환경으로 크게 구분이 가능하였다. 또한 사면퇴적층과 하천퇴적층의 발달은 하천의 경사와 밀접한 관련을 보였다. 연구지역의 퇴적층은 기반암 위에 하천경사의 영향으로 남아 있는 사면퇴적층이 부분적으로 피복하고, 그 상부를 하천퇴적층이 피복하는 형태로 발달한다. 따라서 연구지역의 층서유형은 기반암 상부를 사면퇴적층이 피복하는 사면퇴적환경유형과 하천퇴적층이 피복하는 하천퇴적환경유형, 그리고 사면퇴적층과 하천퇴적층이 모두 나타나는 사면하천퇴적환경유형으로 제안되었다. 이러한 결과는 연구지역에서 퇴적층의 환경변화를 하나의 유형으로 제시할 수 있고, 확장이 유연하여 제4기 지질도 작성에도 매우 유용할 것으로 기대된다.

주요어: 보성강, 제4기 퇴적층, 층서, 층서유형, 방사성탄소연대

Jin-Young Lee, Jin Cheul Kim, Ju Yong Kim, Sei Sun Hong, Jaesoo Lim and Wook-Hyun Nahm, 2016, Profile types of Quaternary deposits in the Boseong River basin, the upper part of the Juam reservoir. Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 3, p. 315-331

ABSTRACT: Alluvial deposit has been used for living and working space for mankind. This study investigates stratigraphy, chronology, and depositional environments from borehole data in the Boseong River area around the upper Juam lake. Sediments from 23 coring sites were used for 53 radiocarbon age datings. The Quaternary sequence in the upper Boseong River area was mainly accumulated during the Holocene. The depositional environments of sediments can be broadly divided into the slope-based depositional system and fluvial environments, which is closely related with stream gradient. The slope deposits partially cover the basement rocks, which in turn is overlain by the upper fluvial deposits. Accordingly, the stratigraphy of Quaternary deposits in the Boseong River area is divided into three profile types representing slope, fluvial and composite of these two depositional types. Such results can provide types of depositional environment change in the Boseong River area, which can be extended and applied to mapping the Quaternary units.

Key words: Boseong River, Quaternary deposits, stratigraphy, profile type, radiocarbon dating

(Jin-Young Lee, Jin Cheul Kim, Ju Yong Kim, Sei Sun Hong, Jaesoo Lim and Wook-Hyun Nahm, The Quaternary Geology Department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

1. 서 론

한반도에 분포하는 제4기 퇴적층은 사면, 하천, 강어귀, 해안 등 다양한 환경에서 형성되고 있으며, 인류의 생활공간으로서 매우 중요하게 활용되고 있다. 특히 하천 상류의 계곡을 따라 소규모로 분포하는 층

적층은 대표적인 제4기의 퇴적층으로 과거부터 현재에 이르기까지 농경지와 경작지 등으로 활발하게 이용되어왔다. 그러나 층적층 상부의 퇴적층은 인간의 활동과 토지의 이용과정에서 교란되거나 인위적 매립 등으로 자연퇴적층이 남아있는 경우가 많지 않다. 전통적인 지질도는 암상을 기준으로 다양한 지질

[‡] Corresponding author: +82-42-868-3066, E-mail: jylee@kigam.re.kr

학적 자료를 제시하는데, 이 과정에서 고화되지 않은 제4기의 퇴적층은 대부분 '충적층'으로 제시된다. 때문에 지질도에 표시되는 '충적층'은 지질도에서 제시되는 암상과 비교하여 형성시기와 환경에 대한 세부적인 정보를 담지 못하고 있다. 또한 제4기의 미고결된 퇴적층은 전통적인 방법으로 지표조사결과를 표현하기에 적절하지 않기 때문에 제4기 지질도 제작과 함께 다양한 방안이 제시되고 있다(Strief, 1978; Booth *et al.*, 2015). 최근 제4기의 연구가 활발해지면서 퇴적환경과 관련한 제4기의 기후와 환경에 대한 많은 연구가 진행되고 있으나, 기초적인 제4기 퇴적층에 대한 정의와 분류, 그리고 분포에 대한 연구는 미진한 상황이다.

제4기 퇴적층을 제4기 동안에 퇴적된 퇴적층으로 정의할 때, 기반암이 노출된 지역과 기반암풍화대 지역을 제외하면 대부분의 현생 지표에 제4기 퇴적층이 분포한다고 할 수 있다. 그러나 이러한 정의는 너무 포괄적이며, 복잡하고 다양한 퇴적 작용과 토양화 작용이 혼재되어 토양과 퇴적층을 구분하는데 한계가 있기 때문에, 현실적으로 이러한 정의를 그

대로 적용하지 못하고 있다. 일반적으로 국내 제4기 지질조사에서 제4기 퇴적층은 제4기 동안에 형성된 퇴적층으로, '1 m 이상의 두께로 사면 정상부와 경사면을 제외한 지역에 나타나는 다양한 환경의 퇴적층'으로 정의되어 왔다.

제4기 퇴적층에서 나타나는 퇴적상과 퇴적층서 및 퇴적환경의 변화는 제4기 연구자들의 주된 연구 대상이었다. 지질학적 관점에서 현존하는 퇴적층에 대한 퇴적환경연구는 과거의 퇴적환경에 대한 효율적인 연구를 위하여 매우 중요한 과정으로 인식되어 왔다. 또한 제4기의 미고결 퇴적층에 대한 연구에서도 시추와 시험굴 등의 다양한 방법을 활용하여 연안과 하천 등의 다양한 환경에서 시추정보를 중심으로 퇴적환경의 발달을 설명해 왔다(Strief, 1978; Baeteman, 2005).

최근 이러한 전통적인 연구를 활용하여 다양한 형태로 제4기 퇴적층의 분포를 도면으로 제작하기 시작하였다. 이 과정에서 기존의 층서와 결합된 층서유형에 대한 도면화가 진행되었다(Bertrand and Baeteman, 2005; Weerts *et al.*, 2005; Bedrossian *et al.*, 2010). 특히 지하의 퇴적층을 효율적으로 활용하

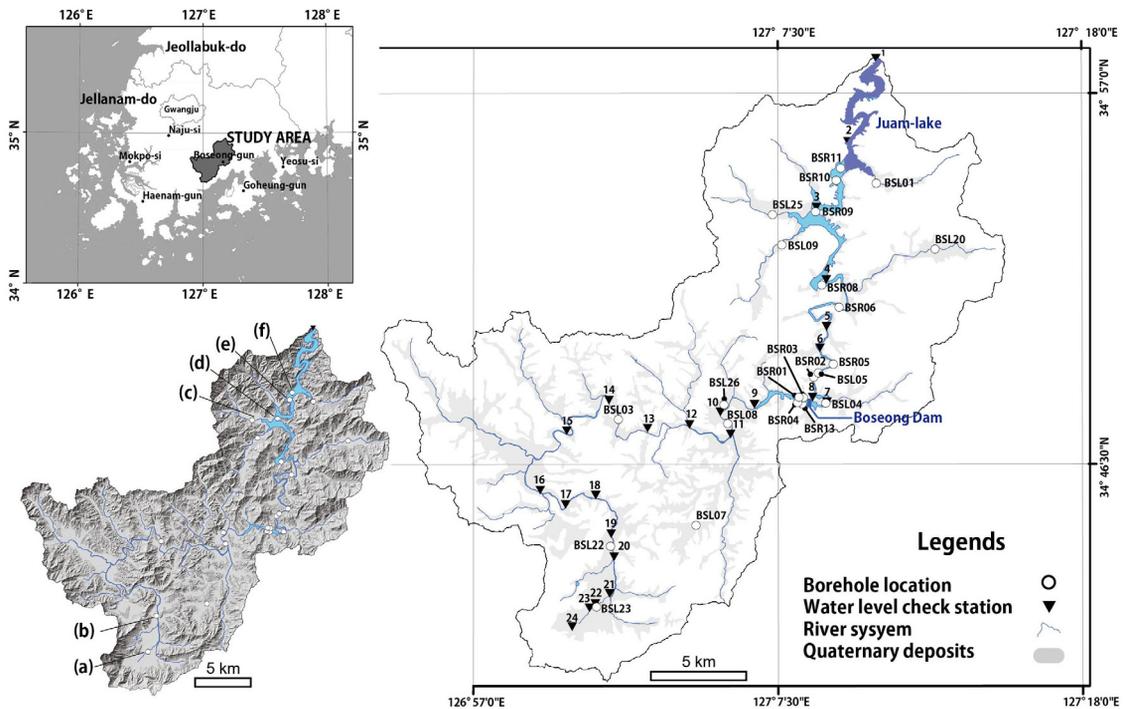


Fig. 1. Borehole locations and water-level check stations in the study area. a ~ f show the locations of overview photo in Fig. 2.

Table 1. Depositional environments and description of sedimentary facies types.

Depositional environments	Facies types	Description
Alluvial slope deposits (A)	colluvium & mass-movement deposits (Am)	Poorly sorted very angular pebbles, gravels and boulders supported by silty sand matrix.
	debris-flow-dominated alluvial fan deposits (Af)	Poorly sorted, clast supported in a coarse grained to medium grained sandy matrix with subangular to subrounded clasts less than 5 cm diameter.
Fluvial deposits (F)	floodplain deposits (Fp)	Moderate to well-sorted, graded sand beds alternating with thin silt layers.
	point bar deposits (Fb)	Medium to coarse sand and silt, occasionally with fine gravel (10%), horizontally stratified
	back-swamp deposits (Fs)	Massive, black and greyish silty clay
	channel deposits (Fc)	Moderate to well-sorted, gravelly fine to coarse sand.

기 위한 노력의 일환으로 지질학적인 측면에서 층서를 포함하는 층서유형(profile type) 및 층서유형도(profile type map)는 시추정보 데이터베이스의 활용과 더불어 지하지질구조, 연약지반의 분포, 해수면의 변화, 해수 침투, 골재자원 개발 등 다양한 측면에서 응용되어 활용되고 있다(Kessler *et al.*, 2009; Baeteman *et al.*, 2011; Van Der Meulen *et al.*, 2013; Delsman, 2014; Maljers *et al.*, 2015).

본 연구는 제4기 퇴적층에 대한 지질학적 층서의 정립과 제4기 지질도 제작을 위하여 보성강 유역, 특히 주암호 상류 유역에서 시추주상시료의 퇴적환경 분류결과를 토대로 보성강 유역에 분포하는 제4기 퇴적층의 층서유형을 제안하고자 한다.

2. 연구지역

연구지역은 행정구역상 전라남도 보성군 문덕면 덕치리 상류지역에 해당되고 지질은 보성강 동편으로는 선캠브리아기 반상변정질 편마암이 분포하고, 서편으로는 선캠브리아기 화강편마암과 선캠브리아기 미그마타이트질 편마암이 분포하고 있으며, 부분적으로 쥐라기 흑운모화강암, 페름기 중부 평안층군 등이 일부 분포한다(Choi *et al.*, 2002).

연구지역의 보성강은 남쪽의 높은 산지에서 북쪽으로 흐르고 있으며, 대체로 산지지형에 발달하여 하천의 폭이 좁고 소규모의 충적층이 발달한다. 보성강 최상류 지역인 보성군 웅치면 일대에는 사면을

따라 선상지가 발달하고 있으며, 선상지를 흐르는 소규모 하천으로 보성강이 발원한다. 보성강을 따라 발달하는 충적층은 상류 지역부터 일정한 경사를 보이고(그림 1, 2a, 2b), 지류와 사면에서 나타나는 선상지와 미약한 하천작용으로 소규모로 발달한다(그림 2c). 연구지역 내에서 보성강 중류 지역인 보성군 보성읍과 미력면 일대에서 상대적으로 넓은 충적층이 발달한다(그림 2d). 중류 지역부터 하류인 보성군 복내면과 문덕면 일대에 이르기까지 보성강을 따라 나타나는 충적층은 일정한 경사를 보이며, 하천이 사행하며 지류와 합쳐지면서 충적층이 발달한다(그림 1, 2e, 2f).

3. 연구방법

시추주상시료 가운데 모래 및 자갈이 포함된 주상시료(sediments core sample)는 시료채취기가 부착된 물을 사용하지 않는 회전식 시추방법으로 획득하였으며, 23개 지점의 시추주상시료를 분석에 사용하였다. 야외에서 획득된 주상시료는 진공포장 상태로 운반되었으며, 실험실에서 시추주상시료 절개 후, 사진 촬영 및 퇴적상 기재를 포함한 시추주상도를 작성하였고, 연대측정을 위한 시료 채취를 병행하였다.

퇴적물의 퇴적구조와 퇴적물의 특징을 통한 개략적인 환경단위의 구분은 사면과 하천의 환경을 연구하는데 매우 유용한 방법으로 사용되어 왔다(Lewin *et al.*, 2005; Chiverrell *et al.*, 2008; Coltorti *et al.*, 2010).

시추주상시료는 자갈과 모래가 많은 지층의 시추과정에서 일부 시료가 교란될 가능성이 있고, 모래 및 자갈층의 퇴적구조가 시추시료에 명확히 남아있는 경우가 많지 않다. 따라서 시추주상시료에서 나타나는 조립 퇴적물의 암상과 퇴적상은 육안식별이 가능한 퇴적구조와 퇴적물의 입도와 분급, 그리고 원마도와 같은 퇴적물의 특징을 기준으로 사면퇴적환경(alluvial slope deposits; type A)과 하천퇴적환경(fluvial deposits; type F)으로 분류하였다(표 1).

시추과정에서 나타날 수 있는 인위적인 교란 가능성을 최대한 배제한 상태에서의 사면퇴적환경은 사면에서 기원된 물질이 주로 퇴적되는 환경으로 각력 또는 아각력의 형태를 보이는 자갈과 거력이 다수 포함되어 나타나며, 분급이 매우 불량하고 괴상(massive)의 퇴적구조를 보인다. 사면퇴적환경에서 나타나는 퇴적층은 사면에서의 포상침식(sheet erosion)과 구곡침식(gully erosion) 작용에 의해 사면 말단부에 형성된 퇴적층(colluvial deposits; collu-



Fig. 2. Overview of borehole sites. Reverse triangle symbols in the photos show the location of drilling sites; BSL23 (a), BSL22 (b), BSL09 (c), BSR09 (d), BSR10 (e), BSR11 (f).

Table 2. List of site location, site elevation, drilling depth, facies and profile types.

Site name	Location in boseong-gun area	Elevation (m)	Depth (m)	Simplified facies	Profile type
BSL01	Mundeok-myeon Yangdong-ri	111.3	5	Fc, Am	III
BSL03	Nodong-myeon Geumho-ri	143.9	6	Fs, Fc	II
BSL04	Gyeombaek-myeon Doan-ri	123.5	8	Fp, Fc, Am	III
BSL05	Gyeombaek-myeon Namyang-ri	119.9	6	Fp, Fc	II
BSL06	Gyeombaek-myeon Pyeongho-ri	117.5	8	Fc, Fp, Fb	II
BSL07	Boseong-eup Kwaesang-ri	151.0	5	Fp, Fc, Am	III
BSL08	Miryek-myeon Dogae-ri	128.4	5	Fp, Fc	II
BSL09	Bongnae-myeon Yujeong-ri	116.4	5	Am	I
BSL20	Yureo-myeon Idong-ri	140.1	6	Fp, Am	III
BSL22	Boseong-eup Daeya-ri	174.8	4	Fp, Fc, Am	III
BSL23	Ungchi-myeon Jungsan-ri	198.9	4	Fc, Am	III
BSL26	Miryek-myeon Dogae-ri	128.2	6.5	Fp, Fc, Am	III
BSR01	Gyeombaek-myeon Yongsan-ri	115.4	6	Fp, Fc, Am	III
BSR02	Gyeombaek-myeon Yongsan-ri	122.9	8	Fp, Fc, Am	III
BSR03	Gyeombaek-myeon Namyang-ri	116.2	3	Fc	II
BSR04	Gyeombaek-myeon Doan-ri	124.8	8	Fp, Fc, Am	III
BSR05	Gyeombaek-myeon Doan-ri	116.2	4	Fc, Am	III
BSR06	Gyeombaek-myeon Seokho-ri	112.6	4.5	Fc	II
BSR08	Yureo-myeon Yureo-ri	104.6	3	Fc	II
BSR09	Bongnae-myeon Bongcheon-ri	102.2	6	Fc, Fp, Fs	II
BSR10	Bongnae-myeon Sicheon-ri	103.3	6	Fp, Am	III
BSR11	Bongnae-myeon Sicheon-ri	104.7	6	Af	I
BSR13	Gyeombaek-myeon Doan-ri	119.0	6	Fp, Fs, Fc	II

vium), 그리고 사면붕괴, 암설류(debris flow) 등으로 구성된 사면 붕적층(mass-movement deposits; Am)과 사면에 위치한 소규모 계곡 입구에서 나타나는 선상지 퇴적층(alluvial fan deposits; Af)으로 분류되었다(표 1).

하천환경에서의 퇴적층은 하천 작용에 의해 퇴적물이 퇴적된 것으로 하안단구(fluvial terrace), 범람원(floodplain), 하도(channel), 사주(point bar), 자연제방(natural-levee), 배후습지(back-swamp) 등에서 퇴적되며, 사면환경에서 퇴적된 퇴적물보다 상대적으로 분급이 양호하고, 원마도가 높다. 실트크기의 입자로 구성되고 엽리 또는 층리가 발달할 경우 범람원 퇴적층(floodplain deposits; Fp)으로 분류하였으며, 하천 잔류자갈과 분급이 양호한 모래층으로 구성되는 경우 하도 퇴적층(fluvial channel; Fc)으로 분류하였다. 주로 모래크기의 입자로 구성되고 층리가

연속적으로 잘 나타나는 경우 사주 퇴적층(fluvial bar; Fb)으로 구분하였으며, 검은 색 또는 암회색을 보이며 실트 크기 보다 작은 세립질 입자로 구성되고 유기물을 다수 포함하는 퇴적층은 배후습지 퇴적층(fluvial back-swamp; Fs)으로 분류하였다(표 1).

현 하상 수위의 고도는 Topcon 사의 GPS를 이용하여 측정하였으며, 50 km 연장으로 24개의 지점에서 동일 시기의 수위 측정이 진행되었다.

제4기 퇴적층의 형성시기를 분석하기 위하여 한국 지질자원연구원의 가속질량분석기(accelerator mass spectrometer, AMS)를 이용하여 방사성탄소연대(^{14}C)측정을 실시하였다. 방사성탄소연대측정을 위한 시료는 식물편과 유기질 퇴적물이며, 퇴적물 시료는 휴믹산(Humic acid) 처리를 통해 흑연을 추출하였고, 식물편 시료는 산-염기-산(AAA) 화학처리를 통해 오염물을 제거한 후 분석용 흑연을 추출

하였다. 본 연구에 적용된 모든 탄소 연대의 보정은 Oxcal을 이용하였고 2σ 오차 범위를 활용하였다 (<http://c14.arch.ox.ac.uk>).

4. 연구결과

4.1 층서유형

시추주상시료의 퇴적상 분석에 의해 사면퇴적환경과 하천퇴적환경으로 구분하고, 이를 통해 층서유형을 사면퇴적환경유형과 하천퇴적환경유형, 그리고 사면하천퇴적환경으로 분류하였다.

사면퇴적환경유형(profile type I)을 보이는 퇴적층은 해발고도 약 116 m에 위치한 보성군 복내면 유정리 퇴적층(BSL09)과 해발고도 약 105 m에 위치한 보성군 복내면 시천리 퇴적층(BSR11)이며, 사면작용에 의해서 퇴적된 사면붕적층과 선상지성 암설류 퇴적층 등이 우세한 사면퇴적층으로 분류되었다(표 2; 그림 2c, 3).

하천퇴적환경유형(profile type II)을 보이는 퇴적층은 해발고도 약 143 m에 위치한 보성군 노동면 금호리 퇴적층(BSL03), 해발고도 약 120 m에 위치한 보성군 검백면 남양리 퇴적층(BSL05), 해발고도 약 118 m에 위치한 보성군 검백면 평호리 퇴적층(BSL06), 해발고도 약 128 m에 위치한 보성군 미력면 도개리 퇴적층(BSL08), 해발고도 약 102 m에 위치한 보성군 복내면 봉천리 퇴적층(BSR09), 그리고 해발고도 약 119 m에 위치한 보성군 문덕면 죽산리 퇴적층(BSR13)이며, 이 지역은 하천 범람원 및 하도, 범람 습지 등의 하천퇴적환경에서 형성된 퇴적층으로 분류되었다. 또한 해발고도 약 116 m에 위치한 보성군 검백면 남양리 퇴적층(BSR03), 해발고도 약 113 m에 위치한 보성군 검백면 석호리 퇴적층(BSR06), 그리고 해발고도 약 105 m에 위치한 보성군 울어면 울어리 퇴적층(BSR08)은 하천의 하도에서 형성된 하천퇴적환경의 퇴적층으로 분류되었다(표 2; 그림 3).

사면하천퇴적환경유형(profile type III)으로 분류된 퇴적층인 해발고도 약 111 m에 위치한 보성군 문덕면 양동리 퇴적층(BSL01), 해발고도 약 116 m에 위치한 보성군 검백면 도안리 퇴적층(BSR05), 그리고 해발고도 약 199 m에 위치한 보성군 웅치면 중산리 퇴적층(BSL23)은 퇴적시기 동안 퇴적환경의 변화를 보이는 퇴적층으로 하부에는 사면퇴적환경

이 나타나고 상부에는 하도퇴적층이 나타난다(그림 2a, 3). 또한 해발고도 약 140 m에 위치한 보성군 울어면 이동리 퇴적층(BSL20)과 해발고도 약 103 m에 위치한 보성군 복내면 시천리 퇴적층(BSR10)은 하부에는 사면퇴적환경이 나타나고 상부에는 하천퇴적환경인 하천 범람원 퇴적층이 나타나는 형태를 보인다. 해발고도 약 123 m에 위치한 보성군 검백면 도안리 퇴적층(BSL04), 해발고도 약 151 m에 위치한 보성군 보성읍 쾌상리 퇴적층(BSL07), 해발고도 약 175 m에 위치한 보성군 보성읍 대야리 퇴적층(BSL22), 해발고도 약 128 m에 위치한 보성군 보성읍 도개리 퇴적층(BSL26), 해발고도 약 115 m에 위치한 보성군 미력면 화방리 퇴적층(BSR01), 해발고도 약 123 m에 위치한 보성군 검백면 용산리 퇴적층(BSR02), 그리고 해발고도 약 125 m에 위치한 보성군 검백면 도안리 퇴적층(BSR04)은 하부에 사면에서 퇴적된 퇴적층이 분포하며, 상부에는 하천 범람원과 하도에서 퇴적된 하천환경퇴적층이 분포한다. 특히 보성군 보성읍 대야리 퇴적층(BSL22)과 보성군 복내면 시천리 퇴적층(BSR10)에서는 사면퇴적환경에서 하천퇴적환경으로 바뀌고, 다시 하천퇴적환경에서 사면퇴적환경으로 바뀌는 두 번의 변화가 있었다(표 2; 그림 3).

4.2 방사성 탄소 연대측정 결과

조사지역의 제4기 퇴적층의 방사성탄소연대 측정결과는 표 3에 제시하였다. 연구지역에서 나타나는 방사성탄소연대는 지역에 따라 차이를 보이거나 분석 결과 약 11,000년 전부터 현재까지의 홀로세 시기 동안에 형성된 것으로 나타난다(표 3; 그림 4).

4.3 현하상 수위의 고도 및 시추지점의 고도 측정 결과

보성강 현 하상에 대한 총 50 km 연장으로 동일 시기의 24개 지점의 해발고도 측정결과 가장 상류 지역에 분포하는 지점의 수위는 해발고도 221 m로 나타났다, 가장 낮은 지점의 수위는 해발고도 102 m로 약 119 m의 고도차를 보였다. 또한 측정된 지점 사이의 경사(하상구배)는 보성군 웅치면 중산리 지역(BSL23)에서 보성읍 대야리 지역(BSL22) 사이의 경사도가 가장 높고, 보성군 노동면 금호리 지역(BSL03)을 경계로 상대적으로 높은 경사도를 유지하다가 하류로

가면서 점차 완만해지는 경향이 나타난다. 현재 보성강댐 내에 위치하고 있는 수위 측정 지점인 7번 지

점과 8번 지점에서 경사도 값은 0°로 보성댐 내에서의 하상고도를 나타낸다. 측정된 각 지점간의 거리

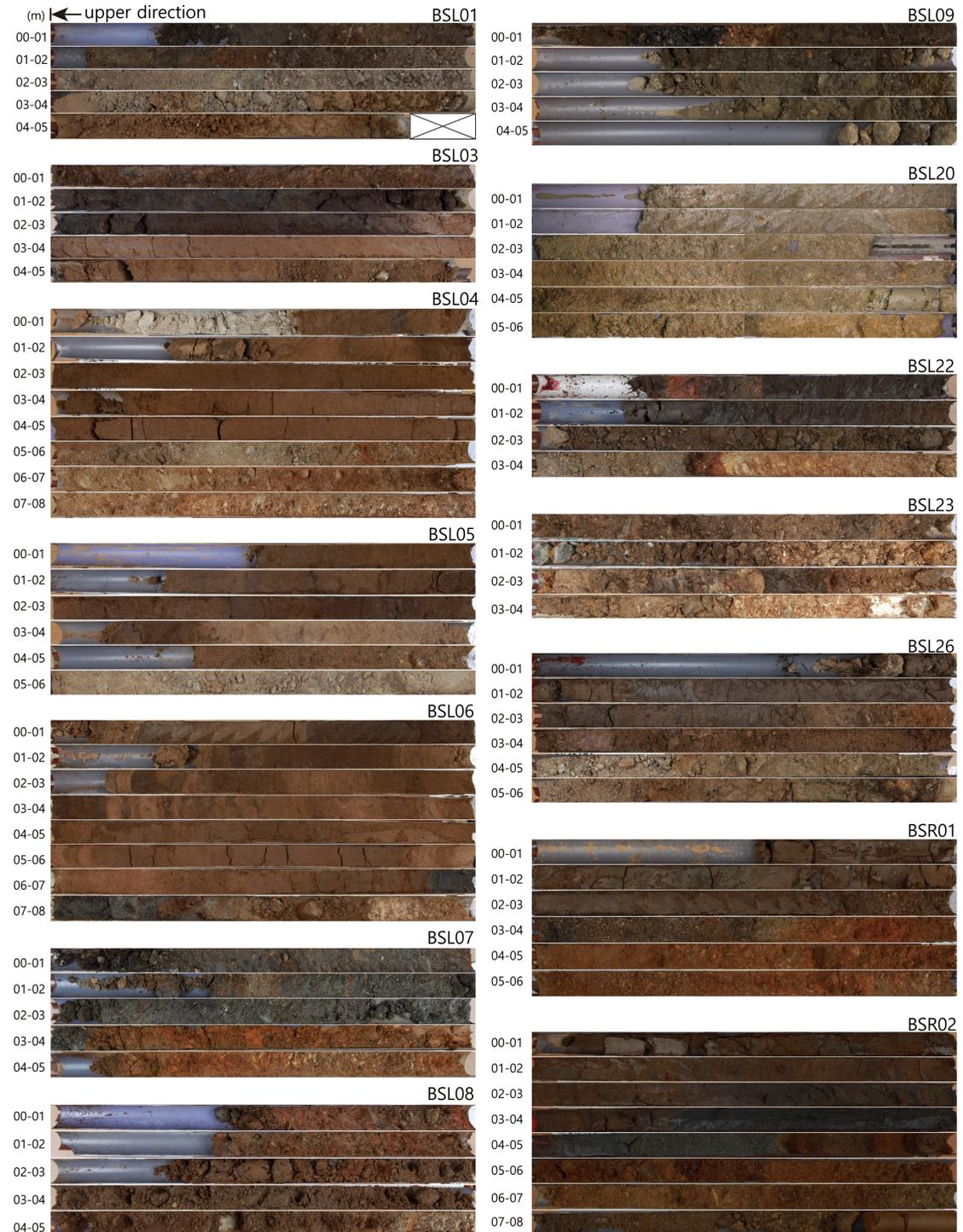


Fig. 3. Photos of cores recovered from study area.

와 경사는 표 4에 제시하였다(그림 5).

5. 토 의

5.1 제4기 퇴적층의 퇴적환경 및 형성시기

본 연구에서는 시추주상시료의 특성과 퇴적환경의 분포(Bertrand and Baeteman, 2005)를 지도로 제작하는 과정을 고려하여 퇴적상을 하나의 단위로 해석하지 않고 퇴적환경을 하나의 단위로 사용하였다(McMillan, 2002; Weerts *et al.*, 2005; Paul, 2016). 이러한 방법은 야외에 노출된 단면의 노두 관찰 또는 비교란 시추 시료를 대상으로 퇴적환경 정밀해석(Xu *et al.*, 2016)을 위한 목적과는 다르게 퇴적환경과 연관된 제4기 환경변화를 해석하는데 목적이 있다(Lewin *et al.*, 2005; Chiverrell *et al.*, 2008).

제4기 퇴적층의 층서연구에 있어서 퇴적상(sedimentary

facies)에 대한 연구는 다양한 퇴적환경을 효과적으로 설명하고 이해하는데 매우 유용한 방법으로 사용되어 왔다. 그러나 현재의 기술 수준에서는 비교란 시료의 채취는 세립질 퇴적물에 국한되고 있으며, 산악지형의 층적층과 같이 모래와 자갈로 구성된 퇴적층의 퇴적구조를 명확하게 확인할 수 있는 비교란 시료의 획득은 현실적으로는 어려운 상황이다. 따라서 모래와 자갈이 우세하게 나타나는 지역에 대한 퇴적상 연구는 대체적으로 시추주상시료에 의존하기 보다는 야외노두와 시험굴 단면(trench profile)에서 진행되어 왔다. 최근 시추기술의 발달로 모래와 자갈을 포함하는 퇴적층의 주상시료를 얻고 있으나, 시추 과정에서 시추공의 타격과 회전 등의 방법이 적용되어 교란되지 않은 상태의 시료 획득을 기대하기는 어렵다. 그럼에도 불구하고 노두를 확인할 수 없거나, 지하 심부에 위치하여 시험굴 조사가 불

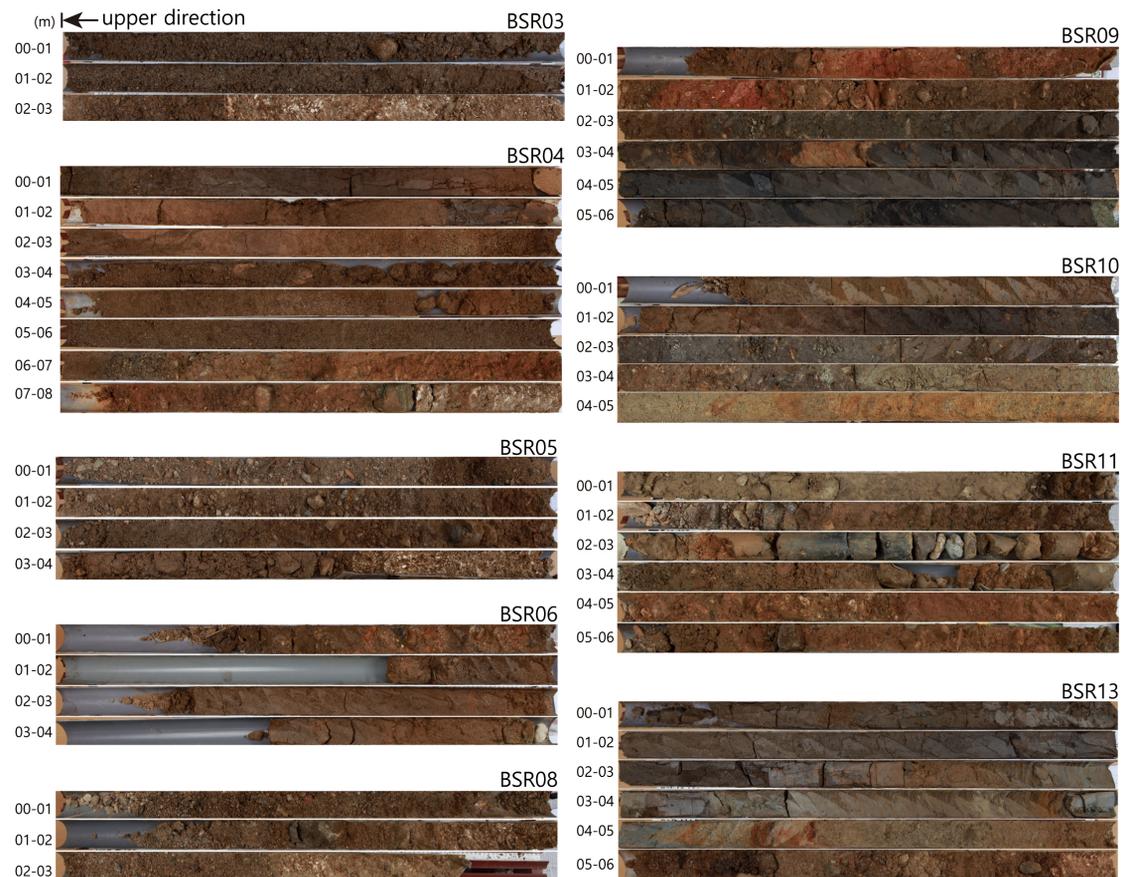


Fig. 3. continued.

Table 3. Radiocarbon dating results.

Sample ID	Material dated	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	^{14}C age yr BP	Calibrated age (2σ range) Cal yr BP	Lab Code in KIGAM
BSL02-3.66	bulk	-29.8	8950±50	10070±160	ITg130421
BSL02-4.23	bulk	-19.5	9310±50	10480±180	ITg130422
BSL03-1.1	bulk	-19.7	80±20	150±120	ITg130280
BSL03-2	bulk	-20.2	650±20	620±60	ITg130283
BSL03-3.9	bulk	-18.5	1130±30	1070±110	ITg130285
BSL04-0.9	bulk	-22.4		modern	ITg130284
BSL04-1.4	bulk	-31.3	400±30	420±100	ITg130270
BSL04-1.85	bulk	-23.3	630±30	610±60	ITg120462
BSL04-3.12	bulk	-27.9	1450±30	1340±50	ITg130271
BSL04-3.9	bulk	-20.7	2600±30	2700±80	ITg130279
BSL04-4.4	bulk	-20.5	2870±30	3010±130	ITg130278
BSL04-4.9	bulk	-22.3	3340±30	3580±110	ITg130288
BSL05-0.5	bulk	-26.5	550±20	580±60	ITg130274
BSL05-1.9	bulk	-19.5	1180±20	1100±90	ITg130289
BSL05-2.41	bulk	-21.2	1600±40	1480±90	ITg130456
BSL05-2.6	bulk	-23.1	1670±30	1610±90	ITg130290
BSL05-2.8	bulk	-21.8	1150±30	1070±100	ITg130291
BSL05-3.28	bulk	-25.7	1140±30	1070±110	ITg130261
BSL06-3.01	bulk	-21.1	440±30	440±100	ITg120455
BSL06-3.75	Charcoal	-24.4	1620±30	1500±90	ITg120310
BSL06-5.64	Charcoal	-25.7	1740±40	1660±120	ITg120302
BSL06-6.98	bulk	-23.2	2630±40	2740±110	ITg120306
BSL07-4.05	bulk	-24	2220±30	2240±90	ITg120427
BSL10-3.6	bulk	-22.2	7030±40	7860±100	ITg120428
BSL26-2.18	bulk	-25.5	1440±30	1340±50	ITg130264
BSL26-2.54	bulk	-28	2960±30	3130±130	ITg130265
BSR01-0.7	bulk	-25.6		modern	ITg130511
BSR01-1.3	bulk	-22.7	560±30	580±60	ITg130512
BSR01-1.7	bulk	-24.4	1270±30	1190±100	ITg130513
BSR01-2.7	bulk	-24.7	1490±30	1400±100	ITg130247
BSR01-3.4	bulk	-30.3	1620±30	1510±100	ITg130521
BSR02-0.76	bulk	-25.5		modern	ITg130246
BSR02-1.4	bulk	-21.6	1330±30	1250±70	ITg130522
BSR02-2.1	bulk	-24.7	2070±30	2040±100	ITg130524
BSR02-2.53	bulk	-21.2	5810±40	6610±120	ITg130418
BSR02-2.9	bulk	-30.6	8510±40	9510±40	ITg130525
BSR02-3.3	bulk	-31.9	8650±40	9620±90	ITg130526
BSR02-3.9	bulk	-34.8	8930±40	10060±150	ITg130527
BSR02-4.1	bulk	-26.5	9380±40	10610±110	ITg130528

Table 3. continued.

Sample ID	Material dated	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	^{14}C age yr BP	Calibrated age (2σ range) Cal yr BP	Lab Code in KIGAM
BSR04-0.2	bulk	-26.2	2010±30	1970±90	ITg130533
BSR04-1.82	bulk	-18.9	2830±30	2960±110	ITg130276
BSR04-6.6	bulk	-26.1	7030±30	7870±80	ITg130535
BSR09-3.81	Charcoal	-28.4	1120±40	1050±120	ITg120448
BSR09-3.95	bulk	-17.8	2370±30	2500±170	ITg130269
BSR09-5.9	bulk	-26.2	3330±30	3560±90	ITg130268
BSR10-1.61	bulk	-32.7	3550±30	3840±120	ITg130266
BSR13-0.6	bulk	-18.8		modern	ITg130244
BSR13-0.8	bulk	-25.8	580±20	590±60	ITg130529
BSR13-1.73	bulk	-20.1	1440±30	1340±50	ITg130248
BSR13-2.05	bulk	-31.4	2170±30	2190±130	ITg130245
BSR13-3.11	bulk	-28.1	2690±30	2810±60	ITg130257
BSR13-3.4	bulk	-21.9	9700±50	11020±220	ITg130532
BSR13-4.05	bulk	-33.1	9690±60	11010±230	ITg130249

가능한 지역에서는 자갈과 모래가 포함된 시추주상 시료가 미고결 퇴적층 연구와 퇴적환경 변화 연구의 중요한 대안이 되고 있다.

일반적으로 하천 상류에 조립 퇴적물이 많고 하류로 가면서 하천의 작용에 의해 분급이 점차 양호하게 변화하며 세립 퇴적물이 많아진다. 이러한 측면에서 사면퇴적환경과 하천퇴적환경의 구분은 하천 작용에 의한 퇴적상 여부를 몇 가지 확인함으로써 구분이 가능하다(Miall, 1985; Nanson and Croke, 1992; Nanson and Knighton, 1996). 그러나 산지와 접한 하천의 사면과 사면에 위치한 계곡부에서 끊임 없이 퇴적물이 하천으로 유입되면서 퇴적되기 때문에 퇴적상에 대한 분석만으로는 하천퇴적환경과 사면퇴적환경의 구분이 어렵다(Harvey, 2012). 사면퇴적환경으로 분류된 퇴적층은 지형 조건에 따라 사면 말단부의 산록완사면(pediments)과 선상지(fan deposits)로 크게 구분되는데, 지형발달 측면에서 현재까지 지형학자들 사이에서 논란이 지속되고 있는 만큼 퇴적상에 대한 판단이 쉽지 않다(Lee *et al.*, 2001; Yoon *et al.*, 2005). 그러나 본 연구지역이 하천의 상류에 속하는 지역에 위치하고, 현재에도 사면과 하천 환경이 교호하는 등(그림 2a, 2b, 2c)의 퇴적환경과 산악 계곡에서 발달하고 있는 하천의 지형적 측면을 고려할 때, 퇴적상에 대한 분류기준을 토대

로 퇴적환경의 구분이 가능한 퇴적층을 먼저 분류하고, 사면퇴적환경과 하천퇴적환경이 혼재하는 환경으로 해석하여 퇴적상을 분류하는 것이 합리적이라 사료된다.

사면퇴적환경에서 형성된 퇴적층은 점토 및 실트, 모래, 각력 또는 아각력 자갈이 섞여 혼합된 형태로 분급이 매우 불량하게 나타난다. 또한 특별한 퇴적구조를 보이지 않기 때문에 어떤 경우에는 인위적으로 교란된 매립층으로 혼동될 수 있는데, 퇴적층상의 위치를 고려하면 매립층과 쉽게 구분된다. 보성군 복내면 유정리 퇴적층(BSL09)과 시천리 퇴적층(BSR11)에서는 이러한 사면퇴적환경을 보이는 퇴적층이 잘 나타난다(그림 2c, 2f, 3).

사면퇴적층의 형성 시기는 보성군 웅치면 중산리 퇴적층(BSL23)에서 440년 전, 보성군 보성읍 쾌상리 퇴적층(BSL07)에서 2,240년 전, 보성군 겸백면 도안리 퇴적층(BSR04)에서 7,870년 전 등으로 확인된다. 또한 연구지역의 사면퇴적층은 기반암 상부를 피복하는 형태로 주로 나타나는데, 과거 이러한 사면퇴적층은 기후환경과 관련지어 형성된 것으로 해석되어 왔다(Chiverrell *et al.*, 2008). 즉, 마지막 빙하기 이후에 따뜻하고 습윤한 기후가 나타나는데 이러한 기후에서는 빙하의 후퇴와 함께 빙하퇴적층이 형성되거나, 강수량이 많아지며 사면에서 퇴적물을 운반

Table 4. Location of water-level survey and related borehole names.

Station	longitude (GRS80)	latitude (GRS80)	elevation (msl; m)	distance (m) ⁺	slope (°)	related site name
1	127° 10' 46"	34° 58' 6"	101.9	4614	0.03	
2	127° 9' 47"	34° 55' 44"	100.5	3830	0.01	BSR11
3	127° 8' 42"	34° 53' 52"	101.0	3847	0.10	BSR09
4	127° 9' 2"	34° 51' 48"	104.9	2459	0.28	BSR08
5	127° 9' 3"	34° 50' 29"	111.8	1165	0.16	BSR06
6	127° 8' 49"	34° 49' 53"	113.7	2855	0.16	BSR05
7	127° 8' 34"	34° 48' 29"	126.3	803	1.01	BSL04, BSR02, BSL05
8	127° 9' 4"	34° 48' 21"	118.2	3076	0.00*	BSR01, BSR02, BSR04, BSR13
9	127° 6' 34"	34° 48' 17"	126.3	1854	0.00*	
10	127° 5' 22"	34° 48' 4"	126.3	1282	0.03	BSL26
11	127° 5' 44"	34° 47' 27"	126.7	2221	0.15	BSL08
12	127° 4' 19"	34° 47' 43"	130.1	2228	0.19	
13	127° 2' 52"	34° 47' 37"	134.4	2499	0.16	
14	127° 1' 32"	34° 48' 25"	138.4	2745	0.23	BSL03
15	127° 0' 5"	34° 47' 32"	144.8	3404	0.32	
16	126° 59' 10"	34° 45' 52"	155.6	1542	0.24	
17	127° 0' 3"	34° 45' 27"	159.4	1649	0.36	
18	127° 1' 5"	34° 45' 43"	165.3	2188	0.27	
19	127° 1' 37"	34° 44' 37"	171.3	1216	0.42	
20	127° 1' 43"	34° 43' 58"	176.3	1934	0.55	BSL20
21	127° 1' 34"	34° 42' 55"	187.0	927	0.97	
22	127° 1' 4"	34° 42' 38"	196.0	367	0.68	
23	127° 0' 52"	34° 42' 31"	198.5	1365	1.65	BSL23
24	127° 0' 16"	34° 41' 59"	221.0			

* inside the dam area (BSR01, BSR02, BSR04, BSR13)

⁺ distance between each station which is calculated from station n to n+1 (n = station number)

하는 작용이 활발하게 있었던 것으로 연구되어 왔다 (Yoon *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2008; Park and Park, 2010). 그러나 이는 본 연구지역에서 형성 시기가 확인된 일부 퇴적층만 관련되기 때문에 퇴적층의 형성과 기후와의 관련성을 직접적으로 해석하기 어렵고, 다만 형성당시의 국지적인 강우 및 지형적 조건에 의해 일시적으로 형성된 퇴적층이었을 가능성을 생각해 볼 수 있다.

하천퇴적환경에서 형성된 퇴적층은 하천 유수의 작용으로 형성되며, 범람원, 자연제방, 하도, 사주 등 다양한 퇴적환경을 보인다. 또한 각각의 환경에 따라 다양한 퇴적구조를 보인다. 그럼에도 불구하고

사면퇴적층과 비교할 때 분급이 양호하며, 원마도가 높게 나타나는 공통적인 특징을 보인다.

다양한 환경에서 형성된 하천퇴적층의 형성시기는 하천퇴적층 최하부의 연대가 확인된 보성군 검백면 도안리 퇴적층(BSR04)과 보성군 복내면 봉천리 퇴적층(BSR09)에서 각각 7,870년 전 이후, 3,560년 전 이후에 형성된 것으로 나타난다. 그러나 대부분의 지역에서 하천퇴적층의 최하부 연대를 확인하지 못해 명확한 형성 시기를 해석하기 어렵다. 다만 조립질 모래와 자갈층을 제외한 비교적 세립질 퇴적층을 중심으로 분석된 방사성탄소연대는 보성군 응치면 증산리 퇴적층(BSL23)에서 440년 전 이후, 보성

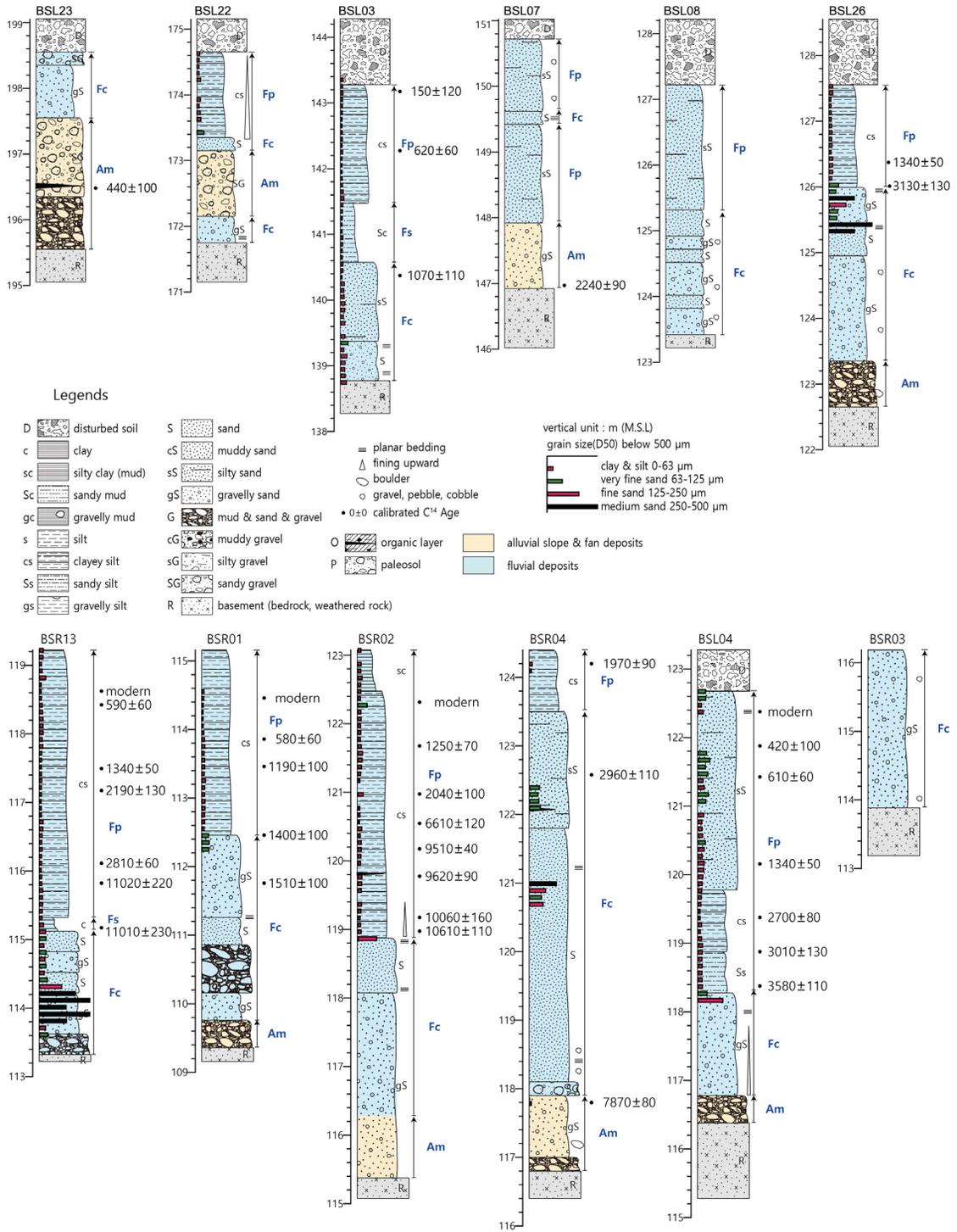


Fig. 4. Stratigraphy of the boreholes with simplified lithology, depositional environments, facies types and calibrated radiocarbon dating ages. Note the elevation is meter scale from GPS survey.

보성군 북내면 시천리 퇴적층(BSR10)에서 3,840년 전 이후로 나타난다. 이러한 결과는 보성군 문덕면 죽산리 퇴적층(BSR13)과 보성군 겸백면 용산리 퇴적층(BSR02)에서 하천퇴적층이 상대적으로 오래된 시기에 형성되었고, 대부분의 지역에서 하천퇴적층이 4,000년 전 이후에 형성되었음을 제시한다(그림 3). 하천퇴적층의 최하부 연대를 확인하지 못했지만, 최하부에 근접하는 보성군 웅치면 중산리 퇴적층(BSL23)에서 440년 전 이후, 보성군 보성읍 쾌상리 퇴적층(BSL07)에서 2,240년 전 이후, 보성군 겸백면 도안리 퇴적층(BSL04)에서 3,580년 전 이후, 보성군 겸백면 평호리 퇴적층(BSL06)에서 2,740년 전 이후, 그리고 보성군 북내면 봉천리 퇴적층(BSR09)에서 3,560년 전 이후에 형성된 것으로 미루어 상대적으로 가장 오래된 시기의 하천퇴적층이 남아있는 보성군 문덕면 죽산리 퇴적층(BSR13)과 보성군 겸백면 용산리 퇴적층(BSR02)을 제외하면 연구지역의 하천퇴적층은 8,000년 전 이후에 형성된 것으로 추정된다(그림 4).

는 2,240년 전 전후에 형성된 것으로 나타난다. 보성군 겸백면 도안리 퇴적층(BSR04)에서는 층서를 고려할 때 사면퇴적층 상부의 퇴적층이 7,870년 전 전후에 형성되었기 때문에 하부에 위치한 사면퇴적층은 이 보다 오래된 퇴적층으로 해석된다. 보성군 웅치면 중산리 퇴적층(BSL23)이 가장 상류에 위치하고 보성군 겸백면 도안리 퇴적층(BSL04)이 가장 하류에 위치한다는 점을 고려한다면 상류지역의 사면퇴적층이 가장 최근에 형성되었으며 하류로 가면서 이보다 오래된 사면퇴적층이 잔류하는 것으로 해석된다. 이러한 경향은 상류로 갈수록 침식이 우세한 환경이 유지되면서 오래된 시기의 퇴적층이 침식되어 남아있지 않음을 의미하며, 고도와 무관하게 지역적으로 나타나는 사면퇴적층은 일시적 사면퇴적 환경이 우세하게 유지되어 형성되고 있었음을 지시한다(그림 5).

또한 사면퇴적층은 하천의 경사와는 크게 관련이 없고 주변 지형과 강우와의 관계에 따라 나타나는 것으로 보이며, 하천의 작용으로 퇴적층의 잔류가 결정되는 것으로도 해석될 수 있다. 즉, 시기적으로 빙하기 이후의 급격한 환경변화로 형성되었을 가능성 보다는 사면에서의 물질이동이 국지적인 현상으로 온난한 시기에 하천으로 퇴적물이 공급되는 과정에서 사면퇴적층이 침식되어 운반되었거나, 잔류하

5.2 퇴적층의 분포 고도 및 형성 시기

보성강 유역에서 사면퇴적층은 보성군 웅치면 중산리 퇴적층(BSL23)에서 440년 전을 전후로 형성되었으며, 보성군 보성읍 쾌상리 퇴적층(BSL07)에서

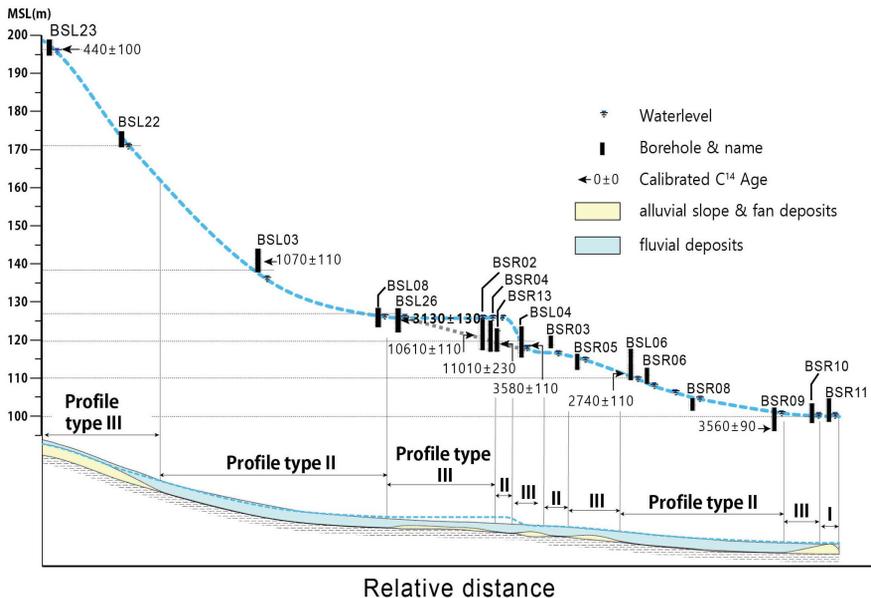


Fig. 5. Schematic diagram of profile types inferred from stratigraphic column of the Quaternary sediments.

는 형태로 남아있었던 것으로 해석된다. 이 과정에서 과거 하천과 관련한 홍수위 또한 관여될 수 있다. 다만 다수의 시추지점에서 정확한 사면퇴적층의 형성시기를 알 수 없고, BSR02 지점의 하부에서 확인되는 10,000년 이전의 사면퇴적층의 형성시기를 고려하면 기후환경의 변화에 의한 퇴적층의 형성 가능성도 있다.

결과적으로 동일한 시기에는 퇴적환경의 차이로 인해 사면과 하천의 퇴적층이 형성되고 있음을 알 수 있다. 그러나 하천퇴적층은 하천구배의 영향으로 침식과 퇴적의 환경에 영향을 주고 있는 것으로 해석된다. 하천구배가 급한 상류에서는 주로 사면퇴적 환경이 우세하며, 하류로 가면서 하천구배가 낮아지는 구간에서는 하천퇴적환경이 우세하게 나타난다. 또한 하천구배가 낮아지는 구간은 퇴적층이 침식되지 않고 지속적으로 퇴적층이 잔류하면서 오래된 시기의 퇴적층이 남아있는 것으로 해석된다.

5.3 층서 발달과 층서유형

보성강 유역의 제4기 퇴적층에 대한 분류는 크게 사면퇴적환경과 하천퇴적환경으로 구분하였다. 연구지역의 퇴적환경에 대한 분류 결과와 연대측정결과를 고려하면, 각 지점에서의 퇴적환경은 시간과 장소에 따라 변화하는 양상이 다르게 나타난다. 즉 퇴적층의 층서는 단일한 퇴적환경이 지속된 상태로 나타나거나, 퇴적환경이 변하여 하부로부터 상부로 가면서 다양한 퇴적환경을 보인다. 따라서 퇴적환경을 사면퇴적환경과 하천퇴적환경으로 구분할 경우, 두 개의 환경이 모두 나타나는 퇴적환경의 변화유형이 나타난다(그림 5).

퇴적환경의 변화에 대해 시간적 순서를 고려하지 않는 경우의 층서유형은 단일 유형인 사면퇴적환경 유형, 하천퇴적환경유형과 복합 유형인 사면하천퇴적환경으로 요약된다. 그러나 만약 시간적 순서와 빈도를 고려하면, 사면-하천, 하천-사면, 사면-하천-사면, 하천-사면-하천 등의 여러 가지 다양한 경우의 수를 갖는 층서유형이 발생한다. 이러한 층서유형의 다양성은 퇴적환경을 정의하는 범주가 많아지거나 퇴적환경의 변화가 다양한 곳에서는 이론적으로 더욱 많은 유형으로 세분이 가능하며, 새로운 퇴적환경이 추가되거나, 시간적 순서와 빈도까지 고려한다면 유형의 수는 더욱 늘어나게 된다(Weerts *et al.*,

2005; Peeters *et al.*, 2016). 연구지역에서 아직 시기를 확인하지 못한 퇴적층의 형성시기가 확인된다면, 플라이스토세 사면봉적층과 홀로세 사면봉적층 그리고 하천퇴적층이 교대되는 몇 가지 층서유형이 추가될 수 있을 것으로 예상된다.

퇴적환경변화의 유형을 나타내는 층서유형은 다양한 형태로 정의되어 퇴적층서의 발달 현황을 설명하는데 매우 유용한 대안으로 제시되어 왔다(Weerts *et al.*, 2005). 특히 층서유형의 분포를 2차원으로 표현되는 지도로 제작하여 시간의 순서 또는 퇴적환경의 변화를 포함하는 3차원 정보를 제공하게 되었고, 이를 제4기 퇴적층 연구 및 활용에 대한 근간이 되는 정보로 인식하게 되었다(Van Der Meulen *et al.*, 2013; Watson *et al.*, 2015; Hou *et al.*, 2016). 따라서 보성강 유역 연구지역의 제4기 지질 분포에 대한 기초정보로 분석된 퇴적환경유형에 대한 정보는 향후 추가 연구를 통해 제4기 지질도의 제작과 응용에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

6. 결 론

주암호 상류의 보성강 유역에 분포하는 제4기 퇴적층은 사면퇴적환경과 하천퇴적환경으로 크게 구분되고, 연대측정을 통해 홀로세에 주로 형성되었음을 확인하였다.

본 연구지역에서 확인되는 퇴적층의 연대분석결과 사면퇴적층과 하천퇴적층이 동시기에 형성되고 있으며, 아직까지 기후와 관련한 특정한 퇴적시기를 확인하기는 어렵고, 일차적으로 퇴적환경에 따라 형성되는 것으로 해석되었다. 다만 하천퇴적층은 하천의 경사도의 영향을 받아서, 하천구배가 급한 상류에서는 침식이 우세한 환경으로 하천퇴적층이 잘 남아있지 않고 최근의 사면퇴적층이 잔류하고 있으며, 하류로 가면서 하천구배가 낮아지는 구간에서는 퇴적이 우세한 환경이 유지되면서 오래된 시기의 하천퇴적층과 사면퇴적층이 잘 남아있는 것으로 해석된다.

연구지역에서 제안된 층서유형은 퇴적환경의 변화에 대해 시간적 순서를 고려하지 않고 기반암 상부에 사면퇴적층이 피복하는 사면퇴적환경유형과 하천퇴적층이 피복하는 하천퇴적환경유형, 그리고 기반암 상부에 사면퇴적층과 하천퇴적층이 모두 나타나는 사면하천퇴적환경유형이다.

이러한 결과는 추가적으로 갯신세와 홀로세 등을 구분하여 시간에 따른 퇴적환경변화를 ‘유형화’ 한다면 퇴적층의 형성시기와 환경변화를 하나의 묶음 단위(unit) 형태로 제시할 수 있으며, 퇴적환경변화 유형에 대한 확장이 유연하여 향후 제4기지질도 제작에 매우 유용할 것으로 기대된다.

사 사

이 논문을 심사해 주시고 유익한 조언과 아낌없는 제언으로 부족한 내용을 보완해 주신 조석주 편집위원장님, 양우현 교수님, 조형래 교수님께 깊이 감사드립니다. 이 연구는 한국지질자원연구원의 연구사업(한반도 중서부 제4기 층서 및 환경변화 연구:16-3113)의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Baeteman, C., 2005, The Streif classification system: a tribute to an alternative system for organising and mapping Holocene coastal deposits. *Quaternary International*, 133-134, 141-149.
- Baeteman, C., Waller, M. and Kiden, P., 2011, Reconstructing middle to late Holocene sea-level change: A methodological review with particular reference to ‘A new Holocene sea-level curve for the southern North Sea’ presented by K.-E. Behre. *Boreas*, 40, 557-572.
- Bedrossian, T.L., Roffers, P. and Hayhurst, C.A., 2010, Geologic compilation of Quaternary surficial deposits in southern California: California geological survey. Special report 217, map scale 1:100,000.
- Bertrand, S. and Baeteman, C., 2005, Sequence mapping of Holocene coastal lowlands: the application of the Streif classification system in the Belgian coastal plain. *Quaternary International*, 133-134, 151-158.
- Booth, S., Merritt, J. and Rose, J., 2015, Reprint of “Quaternary provinces and domains - a quantitative and qualitative description of British landscape types”. *Proceedings of the Geologists' Association*, 126, 608-632.
- Chen, J., Dai, F. and Yao, X., 2008, Holocene debris-flow deposits and their implications on the climate in the upper Jinsha river valley, China. *Geomorphology*, 93, 493-500.
- Chiverrell, R.C., Harvey, A.M., Hunter, S.Y., Millington, J. and Richardson, N.J., 2008, Late Holocene environmental change in the Howgill Fells, Northwest England. *Geomorphology*, 100, 41-69.
- Choi, P.Y., Choi, H.I., Hwang, J.H., Kee, W.S., Koh, H.J., Kim, Y.B., Lee, B.J., Song, K.Y., Kim, J.C. and Choi, Y.S., 2002, Geologic report of the Mokpo-Yeosu sheet (1:250,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 45 p (in Korean with English abstract).
- Coltorti, M., Pieruccini, P. and Paredes, F.R., 2010, Late Pleistocene stratigraphy, sedimentology and paleo-environmental evolution of the Tarija-Padcaya basin (Bolivian Andes). *Proceedings of the Geologists' Association*, 121, 162-179.
- Delsman, J.R., Hu-A-Ng, K.R.M., Vos, P.C., De Louw, P.G.B., Oude Essink, G.H.P., Stuyfzand, P.J. and Bierkens, M.F.P., 2014, Paleo-modeling of coastal salt-water intrusion during the Holocene: An application to the Netherlands. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 3891-3905.
- Harvey, A.M., 2012, The coupling status of alluvial fans and debris cones: A review and synthesis. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, 64-76.
- Hou, W., Yang, L., Deng, D., Ye, J., Clarke, K., Yang, Z., Zhuang, W., Liu, J. and Huang, J., 2016, Assessing quality of urban underground spaces by coupling 3D geological models: The case study of Foshan city, South China. *Computers & Geosciences*, 89, 1-11.
- Kessler, H., Mathers, S. and Sobisch, H.-G., 2009, The capture and dissemination of integrated 3D geospatial knowledge at the British Geological Survey using GSI3D software and methodology. *Computers & Geosciences*, 35, 1311-1321.
- Lee, M.-B., Lee, G.-R., Yoon, S.-O., Hwang, S.-I. and Choe, H.-S., 2001, Geomorphostratigraphic analysis of confluent alluvial fan in Yeoncheon fault zone of Chugaryung rift valley, central Korea. *Journal of the geological society of Korea*, 37, 345-364 (in Korean with English abstract).
- Lewin, J., Macklin, M.G. and Johnstone, E., 2005, Interpreting alluvial archives: sedimentological factors in the British Holocene fluvial record. *Quaternary Science Reviews*, 24, 1873-1889.
- Maljers, D., Stafleu, J., Van Der Meulen, M.J. and Dambrink, R.M., 2015, Advances in constructing regional geological voxel models, illustrated by their application in aggregate resource assessments. *Geologie en Mijnbouw/Netherlands Journal of Geosciences*, 94, 257-270.
- McMillan, A.A., 2002, Onshore Quaternary geological surveys in the 21st century-a perspective from the British Geological Survey. *Quaternary Science Reviews*, 21, 889-899.
- Miall, A.D., 1985, Architectural-element analysis: A new

- method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth-Science Reviews*, 22, 261-308.
- Nanson, G.C. and Croke, J.C., 1992, A genetic classification of floodplains. *Geomorphology*, 4, 459-486.
- Nanson, G.C. and Knighton, A.D., 1996, Anabranching rivers: Their cause, character and classification. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21, 217-239.
- Park, J.-H. and Park, K., 2010, Mass-movement of slope material since the last glacial period at Angol basin within downstream area of Gurongcheon in Cheonan, Choongnam Province. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 17, 31-47 (in Korean with English abstract).
- Paul, J.D., 2016, High-resolution geological maps of central London, UK: Comparisons with the London underground. *Geoscience Frontiers*, 7, 273-286.
- Peeters, J., Busschers, F.S., Stouthamer, E., Bosch, J.H.A., Van den Berg, M.W., Wallinga, J., Versendaal, A.J., Bunnik, F.P.M. and Middelkoop, H., 2016, Sedimentary architecture and chronostratigraphy of a late Quaternary incised-valley fill: A case study of the late middle and late Pleistocene Rhine system in the Netherlands. *Quaternary Science Reviews*, 131, 211-236.
- Streif, H., 1978, A new method for the representation of sedimentary sequences in coastal regions. *Coastal Engineering*, 1245-1256.
- Van Der Meulen, M.J., Doornenbal, J.C., Gunnink, J.L., Stafleu, J., Schokker, J., Vernes, R.W., Van Geer, F.C., Van Gessel, S.F., Van Heteren, S., Van Leeuwen, R.J.W., Bakker, M.A.J., Bogaard, P.J.F., Busschers, F.S., Griffioen, J., Gruijters, S.H.L.L., Kiden, P., Schroot, B.M., Simmelink, H.J., Van Berkel, W.O., Van Der Krogt, R.A.A., Westerhoff, W.E. and Van Daalen, T.M., 2013, 3D geology in a 2D country: Perspectives for geological surveying in the Netherlands. *Geologie en Mijnbouw/Netherlands Journal of Geosciences*, 92, 217-241.
- Watson, C., Richardson, J., Wood, B., Jackson, C. and Hughes, A., 2015, Improving geological and process model integration through TIN to 3D grid conversion. *Computers and Geosciences*, 82, 45-54.
- Weerts, H.J.T., Westerhoff, W.E., Cleveringa, P., Bierkens, M.F.P., Veldkamp, J.G. and Rijdsdijk, K.F., 2005, Quaternary geological mapping of the lowlands of The Netherlands, a 21st century perspective. *Quaternary International*, 133-134, 159-178.
- Xu, T., Wang, G., Shi, X., Wang, X., Yao, Z., Yang, G., Fang, X., Qiao, S., Liu, S., Wang, X. and Zhao, Q., 2016, Sequence stratigraphy of the subaqueous Changjiang (Yangtze River) delta since the Last Glacial Maximum. *Sedimentary Geology*, 331, 132-147.
- Yoon, S.-O., Saito, K., Hwang, S.-I., Tanaka, Y. and Oguchi, T., 2005, The Theoretical study and distributional characteristics of alluvial fans in Korean peninsula. *Journal of the Korean Geographical Society*, 40, 335-352 (in Korean with English abstract).

Received : March 16, 2016

Revised : May 5, 2016

Accepted : May 11, 2016